

氰基化合物在锂离子电池中研究进展

时二波^{1,2}, 甘朝伦², 张鹏³, 赵金保⁴, 赵世勇²

(1. 南京大学材料现代工程与应用科学学院, 江苏南京 210093; 2. 张家港市国泰华荣化工新材料有限公司, 江苏张家港 215634; 3. 厦门大学能源学院, 福建厦门 361102; 4. 厦门大学化学化工学院, 福建厦门 361005)

摘要: 添加剂/有机溶剂作为锂离子电池的重要组成部分,对电池的性能发挥着至关重要的作用。基于氰基的有机化合物被广泛用于电解液研究中,简单综述了氰基化合物或衍生物作为添加剂/溶剂在锂离子电池中的研究进展,主要包含单官能团及多官能团氰基化合物。以期对未来高性能、多功能新型添加剂的研究开发提供参考。

关键词: 锂离子电池; 添加剂; 氰基; 电解液

中图分类号: TM912 文献标识码: A 文章编号: 1002-087X(2020)02-0281-04

DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2020.02.036

Research progress of nitrile-based compounds for lithium ion batteries

SHI Er-bo^{1,2}, GAN Chao-lun², ZHANG Peng³, ZHAO Jin-bao⁴, ZHAO Shi-yong²

(1. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210093, China; 2. Zhangjiagang Guotai Huarong New Chemical Material, Co., Ltd., Zhangjiagang Jiangsu 215634, China; 3. College of Energy, Xiamen University, Xiamen Fujian 361102, China; 4. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract: Additives/organic solvents, important parts of lithium-ion batteries, play a vital role in the performance of batteries. Cyano-based organic compounds are widely used as crucial ingredients in the electrolyte of lithium ion batteries. The research progress of cyano-based compounds and their derivatives as additives/solvents in lithium ion batteries were briefly reviewed, mono-functional group and multi-functional group cyanyl compounds were mainly contained. So references could be provided for the research and development of high-performance, multi-functional new additives in the future.

Key words: lithium ion batteries; additives; nitrile; electrolyte

近年来,锂离子二次电池由于具有高比能量、寿命长、轻量化、薄膜化及小体积等特点得到广泛应用。但现有电池体系仍存在不足之处^[1]:(1)存在不可逆容量;(2)使用温度限制;(3)安全问题;(4)离子传输等问题。其中行之有效的方法是研究不同类型的功能添加剂。发展新添加剂,可最大限度高效地解决现有问题,获得性能优异的锂离子电池。添加剂的使用可以改善电极的表面形貌,抑制枝晶生长;提高安全性等。随着研究的深入,添加剂种类层出不穷。按所起作用分为成膜、阻燃、过充保护添加剂和浸润性添加剂等;按电极的作用分为正极和负极添加剂等;按所含主要元素分为含磷、含硫、含氟、含氮添加剂及新型锂盐类^[2]。含氮添加剂主要包括腈类及含氮杂环^[3]。腈是指结构中含氰基的一类有机化合物,近年来,氰基化合物因较宽的电化学窗口,适中的介电常数,良好的物理及热稳定性^[4]具有高的氧化稳定性及低可燃性,使其在高电压正极方面得到广泛研究^[5-6]。本文主要综述了锂离子电池电解液中研究较为广泛的腈类化合物,分为单官能团和多官能团腈类。

收稿日期:2019-07-12

作者简介:时二波(1986—),男,山西省人,博士,工程师,主要研究方向为锂离子电池功能材料。

通信作者:赵世勇(1971—),男,河北省人,硕士,研究员级高工,主要研究方向为锂离子电池功能材料。

1 单官能团腈类

1.1 溶剂/共溶剂方面的应用

单官能团腈按所含氰基数分为单氰基、二氰基和三氰基等。含单一氰基的化合物在锂离子电池添加剂或溶剂中研究相对较少。烷基单氰基化合物(碳原子数<10)室温条件下为液态,低熔点、低粘度和高介电常数的特点使其多作为溶剂使用。

乙腈作为最简单的腈类化合物,作为溶剂具有很好的耐氧化性^[7],高介电常数使其容易溶解各种盐,具有高的离子传导率。将其用于锂离子电池可克服碳酸酯溶剂体系 4.2 V 电压的限制,为研究 5 V 高电压锂电池提供可能。虽然乙腈作为电解液溶剂具有诸多优点,但因其差的还原稳定性,并未被广泛应用于现有锂电池中。2014 年, Yamada 等^[8]首次报道了乙腈在超高盐浓度电解液中实现锂在石墨中可逆嵌入,第一性原理计算及光谱分析表明该体系特有的还原稳定性源于溶剂及阴离子与锂离子配位形成了液体聚合物网络,从而改变乙腈前线轨道的性质。同年, Yamada 研究了乙腈在超高盐浓度电解液中还原稳定性的机理,结果表明,盐浓度高时有足够多的 LiTFSI 盐负离子优于乙腈发生反应形成 SEI 膜,从而保护乙腈,当低浓度时无足够 LiTFSI 盐负离子参与 SEI 膜形成,迫使乙腈发

生反应。Henderson 等^[8]选择乙腈作为溶剂系统研究了电解液中溶液组成结构对其性质的影响,选择乙腈进行研究,因其是最简单的腈类化合物,且作为溶剂与盐阳离子溶剂化作用单一,作为模型研究为其它氰或二腈相关研究提供有利参考。

此外,2014 年 Song 等^[9]研究了丙腈或丁腈作为 EC 的共溶剂,因其低熔点、低粘度的性质,极大降低了传统碳酸酯溶剂体系的使用温度下限,首次实现了零下 20 °C 可逆充放电。如:丙腈在 1 C 条件下有效容量达 62%,3 C 时为 46%。2016 年, Lee 等^[10]研究了基于双氰基-单氰基(丁腈和丙腈)电解液体系中单氰基还原分解机理,研究表明丁腈可以与金属锂发生一系列反应生成含氮杂环小分子及亚胺聚合物,如图 1 所示,通过将质量分数 5% 的成膜添加剂 EC 加入戊二腈/丁腈(6/4)体系可以有效抑制丁腈与锂的反应。

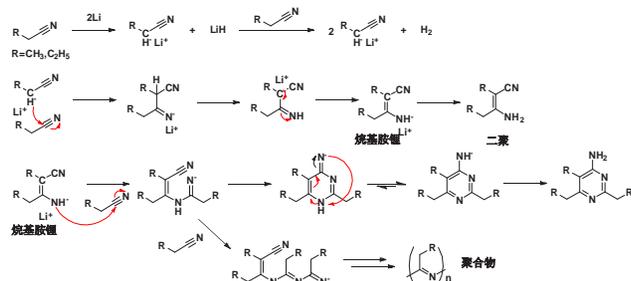


图 1 腈类化合物与锂的反应路线

此外有报道丁二腈(SN)作为共溶剂在电解液中的应用。SN 具有较宽的塑化温度区间(-40~60 °C),高沸点(267 °C),低熔点,低饱和蒸气压的特点,同时与锂盐有良好的相容性及好的离子传导能力。Zhang 等^[11]报道了 SN 与氟代碳酸乙烯酯(FEC)作为共溶剂可以提高热稳定性、离子传导率及使电化学窗口变宽(4.7 V)。研究表明,加入 SN 后可在电极与电解液界面形成稳定的界面膜,有效抑制副反应的发生。近来,该课题组又报道了 SN 与 FEC 作为共溶剂,可使 LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O₂/Li 电池体系电压提高至 4.7 V^[12]。

1.2 添加剂方面的应用

与单氰基相比,双氰基化合物研究较为广泛,且主要用作添加剂,包括丁二腈、戊二腈、己二腈、庚二腈、辛二腈、癸二腈等。Chen 等^[13]报道了添加质量分数 1% SN 的商业电解液可显著提高 Li_{1.2}Ni_{0.2}Mn_{0.6}O₂/Li 体系的循环性能和热稳定性,同时电化学氧化窗口可达到 5.4 V(vs. Li⁺/Li)。电池性能的提升归因于形成了规整的正极电解质界面膜。

Lee 等^[14]报道了 SN 作为铜电极的腐蚀抑制剂提高锂离子电池的抗过冲性能,加入 SN 后可使铜负极耐受电压由 3.5 V(vs. Li⁺/Li)提高至 4.5 V。如图 2 所示,无 SN 存在时,铜高于 3.5 V(vs. Li⁺/Li)时被氧化为一价铜离子。加入 SN 后,在 2.8 V 时铜离子与 SN 中的氰基作用形成基于 Cu(SN)₂PF₆ 的配位聚合物,表面的 SN-铜配合物层抑制了铜的进一步溶解。

作为同系物其它烷基二腈中的戊二腈^[15]、己二腈^[15]、庚二腈^[15-16]、辛二腈^[16]、癸二腈^[16]在锂离子电池领域也有研究。上述烷基二腈均表现出高热稳定性、宽电化学窗口及可用于高电压体系等优点。与此同时,其由于链长不同在性质上表现出一些

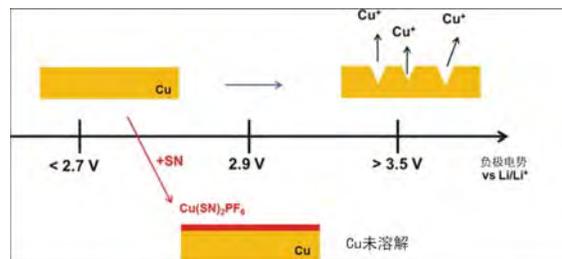
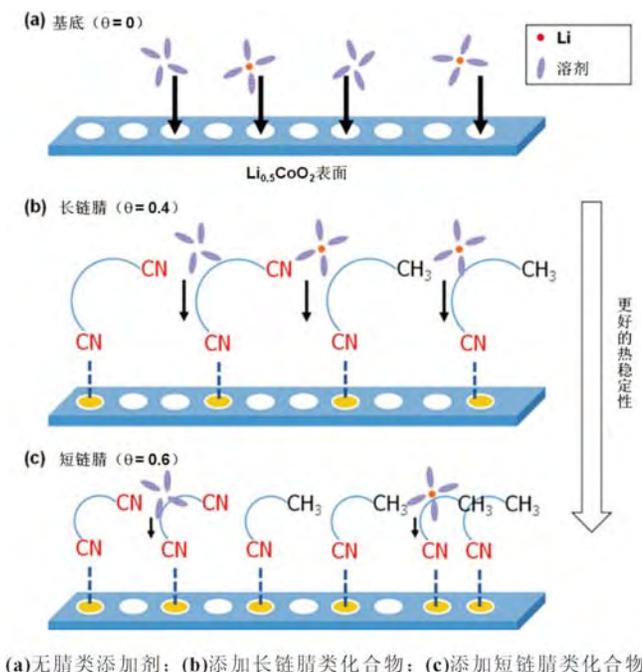


图 2 SN 抑制铜电极腐蚀示意图

差异,有课题组对烷基二腈的性质进行了比较。2014 年, Song 等^[16]比较了三个二腈(SN、庚二腈和癸二腈)与三个单腈化合物(丁腈、庚腈和癸腈)两种不同系列烷基腈对正极活性材料与电解液的热促副反应的抑制作用。研究表明,其中表面覆盖度、氰基分子烷基部分的位阻大小和链极性三个因素对耐热性及最终性能影响显著。如图 3 所示,无添加剂存在时,溶剂分子或与金属锂发生溶剂化作用的溶剂分子直接与正极表面接触,如图 3(a)所示,导致温度升高时发生副反应;加入腈类添加剂后,有效抑制了溶剂与正极表面的直接接触,先于溶剂分子,氰基在正极表面附着。氰基的个数及链长影响着分子在正极表面的覆盖度及位阻大小,高覆盖度和大位阻可有效保护正极表面,而表面覆盖度与分子位阻呈现负相关,癸二腈分子体积大导致位阻大,但也导致其在正极表面的覆盖度降低,如图 3(b)所示,使得溶剂分子仍可与正极表面接触发生副反应;碳原子个数为 2 或 5 时,可在正极表明形成理想保护层,如图 3(c)所示,两者表现出相似的热稳定性。



(a)无腈类添加剂;(b)添加长链腈类化合物;(c)添加短链腈类化合物

图 3 腈类添加剂在正极表面覆盖度(θ)及所含脂肪链位阻大小示意图

2015 年, Dahn 等^[15]比较了 SN、己二腈和庚二腈高电压时的性能。结果表明基于 Li[Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}]O₂/石墨(NMC111/石墨)的电池在 2.8~4.2 V 时,腈类添加剂的加入对电池循环性能没有明显影响,当电压升高至 4.5 V 时,基于 Li[Ni_{0.4}Mn_{0.4}

Co_{0.2}O₂/石墨(NMC111/石墨)的电池,有效减少可逆容量的损失,同时可减少60℃存储时气体的产生。实验结果显示SN与己二腈和庚二腈相比,能更好地发挥作用。SN通过抑制电解液在正极发生氧化,提高4.5V时电池循环寿命。二氰基化合物虽然有诸多优点,但通常在石墨或金属锂负极难以形成稳定的SEI膜,幸运的是可以加入EC或FEC等功能添加剂保护负极和电解质界面。

此外,有课题组研究了烷基三腈作为添加剂在锂电池中的应用。2018年,Lai等^[10]报道1,3,5-戊烷三腈(PTN)提高钴酸锂正极高电压时的电化学特性。PTN可在正极侧形成非常稳定的薄膜,有效抑制电解液的分解及降低界面阻抗。2017年,Gao等^[17]研究了1,3,6-己烷三腈(HTN)作为添加剂提高Li_{1.2}Ni_{0.13}Co_{0.13}Mn_{0.54}O₂正极高电压下(4.8V)的电化学性能。线性扫描伏安结果显示HTN可以提高电解液的氧化电势,HTN在正极形成膜,有效阻止了正极材料在高电压下被破坏。成膜机理如图4所示,HTN结构中的氰基与正极表面金属离子形成强的相互作用,形成稳定、均一的正极界面膜,有效阻止电解液与正极材料的直接接触,从而避免电解液的氧化分解,同时阻止氢氟酸对正极材料的腐蚀及正极材料中金属离子的溶解。

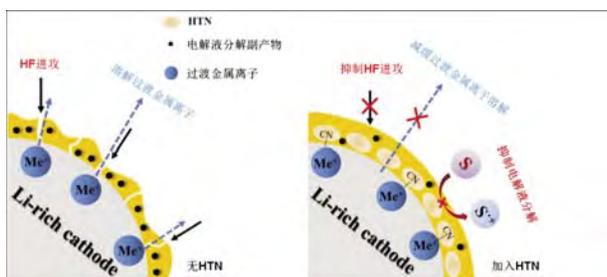


图4 HTN添加剂在正极表面修饰示意图

1.3 固态电解质方面的应用

SN作为研究最广泛的二腈类添加剂,不仅在热稳定性、高电压、抗过充等方面表现出一定优点,其在固态电解质方面也有研究。近来,Chen等^[18]报道了作为塑化剂制备的基于Li_{6.4}La₃Zr_{1.4}Ta_{0.6}O₁₂/PEO/LiTFSI固态电解质的薄膜电池具有良好的界面相容性,电化学窗口宽至5.5V(vs. Li/Li⁺),60℃,0.5C条件下循环200次比容量仍可保持到151.1mAh/g。与液态塑化剂不同,SN在-40~60℃均为晶相,既可保持机械加工性能又具有高安全性。SN中氰基与锂离子的相互作用有利于固态电解质的离子传导率。

综上,单官能团腈类中作为溶剂或共溶剂可以改善电池的低温或高温性能等,在使用成本方面与现有电解液溶剂相比尚有劣势。作为添加剂使用的双氰基和三氰基化合物,可以改善电池的热稳定性、提升高电压性能及循环稳定性等,主要得益于氰基可以与正极材料形成稳定规整的正极电解液界面膜,有效抑制副反应的发生;同时氰基可有效降低电解液中的水分及氢氟酸,最终使得电池性能得到提升。

2 多官能团腈类

鉴于烷基腈类各种优异性能,将氰基与其它官能团进行有效结合,研究新型功能添加剂或共溶剂至关重要。

2.1 作为添加剂在锂离子电池中的应用

早在2003年,Winter等^[19]报道了丙烯腈作为石墨负极成膜添加剂的研究,如图5所示。丙烯腈中氰基的强吸电子效应,促使乙烯基亲电性增强,从而有利于还原,在石墨负极发生电聚合反应形成SEI膜。2016年,Wu等^[20]报道了含砜基的硫酰二丙腈(SDPN)作为LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂/graphite体系添加剂,可以提高高压条件下电池性能。结果表明SDPN在正极侧形成界面薄膜,有效降低了高压状态下界面阻抗,防止电解液的分解及抑制过渡金属的溶解。2018年,Nan等^[21]研究了3-苯磺酰基丙腈(PSPN)作为高电压双官能团电解液添加剂对锂电池性能的提升。研究表明,PSPN可以在钴酸锂正极和石墨负极同时形成SEI膜。Li/LiCoO₂和Li/石墨半电池在200次循环后容量分别从10.12%和79.19%增加至74.81%和92.58%。Ouyang等^[23]报道了1,2-双(氰乙氧基)乙烷(EDPN)作为添加剂可在LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂正极表面形成稳定保护层,抑制电解液氧化分解及阻抗的增加,提升高电压(4.5V)性能。Li等^[22]报道了EDPN可以改善Li/Li_{1.2}Mn_{0.54}Ni_{0.13}Co_{0.13}O₂高电压下(4.8V)电池的循环稳定性及倍率性能。

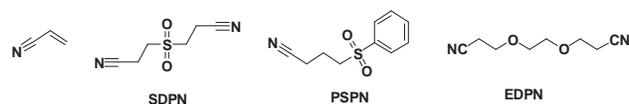


图5 作为添加剂应用于锂离子电池电解液的多官能腈类化合物

2.2 作为溶剂/共溶剂在锂离子电池中的应用

近年来,含二硅氧烷基及硅基醚结构单元的腈基化合物作为非挥发性及环境友好的电解液溶剂得到了广泛研究,如图6所示。2015年,Wiemhöfer等先后报道了1,3-双(氰基丙基)四甲基二硅氧烷(TmdSx-CN)、1,3-双(氰基乙氧基)四甲基二硅氧烷(TmdSx-OPN)^[23]和3-三甲基硅氧基丙腈(TMS-OPN)^[24]作为电解液溶剂的应用。使用含二硅氧烷腈基化合物作为溶剂可以有效避免LiTFSI存在时铝集流体的腐蚀,同时电化学稳定窗口变宽^[22];改善体系的化学及热稳定性^[23]。含氰基的硅醚作为溶剂同样可改善化学及热稳定性,LiTFSI作为锂盐可很好地兼容LiFePO₄,LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O₂及石墨电极材料。2016年,Lyons等^[25]研究了含氟硅烷腈基化合物(Si-ACN)与传统碳酸酯类溶剂的离子传导率。结果显示以LiPF₆或LiTFSI作锂盐,前者可达1mS/cm,同时其锂离子转移数也高于后者;而当与EC和DEC混用时离子传导率高达5.6mS/cm。虽然含硅元素的腈类化合物在电解液溶剂方面表现出一定的优势,但由于其成本高于现有商用溶剂,直接限制了大规模的应用。

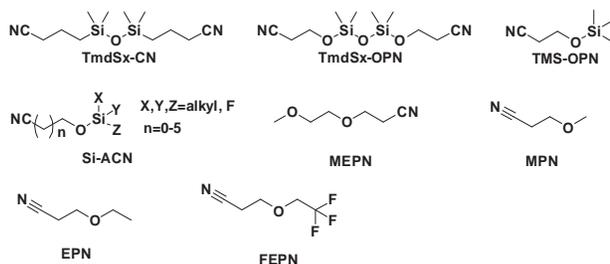


图6 作为溶剂/共溶剂应用于锂离子电池电解液的多官能腈类化合物

此外,含醚结构氰基化合物也可用作溶剂/共溶剂。Yang等^[20]研究了3-(2-甲氧基乙氧基)丙腈(MEPN)作为FEC的共溶剂使用时可有效提高电池的安全性,电解液氧化电势可以达到4.8 V(vs. Li/Li⁺),25 °C时电导率达5.42 mS/cm。基于石墨/LiMn₂O₄的扣电池呈现出比使用传统电解液时更好的倍率和循环性能。Exnar^[27]课题组先后报道了3-甲氧基丙腈(MPN)、3-乙氧基丙腈(EPN)和3-(2,2,2-三氟乙氧基)丙腈(FEPN)作为溶剂基于Li₄Ti₅O₁₂电池的研究,MPN与锂离子的去溶剂化作用或与电极的弱相互作用,使其界面处发生快的电荷转移,有效提高了倍率性能,其次MPN易形成准固态状的凝胶态,可提高基于Li₄Ti₅O₁₂-LiCoO₂电池的倍率性能。同样EPN和FEPN作为溶剂也表现出类似的性能。

3 总结与展望

本文综述了单氰基官能团,双氰基/三氰基及含多官能团氰基化合物在锂离子电池方面的应用研究。多数氰基化合物或其衍生物具有优良的物理及电化学稳定性,可有效提高电池的安全性及稳定性;可有效提高正极在高电压条件下的性能,对于研究开发高电压锂离子电池具有重要意义。该类化合物同样存在不足之处:(1)作溶剂在成本方面高于现阶段商业溶剂,不利于成本的控制;(2)部分氰基化合物具有一定毒性;(3)部分氰基化合物制备合成困难。多官能团多功能添加剂将是未来添加剂发展的主体方向,期待未来发现更多结构的新型添加剂,最终实现锂离子电池质的飞跃。

参考文献:

- [1] XU K. Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries[J]. *Chemical Reviews*, 2004, 104(10): 4303-4418.
- [2] ZHAO W, JI Y, ZHANG Z, et al. Recent advances in the research of functional electrolyte additives for lithium-ion batteries[J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2017, 6(1): 84-91.
- [3] WANG C, YU L, FAN W, et al. 3, 3'-(ethylenedioxy) dipropionitrile as an electrolyte additive for 4.5 V LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂/graphite cells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(11): 9630-9639.
- [4] JI Y, ZHANG Z, GAO M, et al. Electrochemical behavior of suber-onitrile as a high-potential electrolyte additive and Co-solvent for Li[Li_{0.2}Mn_{0.56}Ni_{0.16}Co_{0.08}]O₂ cathode material[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2015, 162(4): A774-A780.
- [5] KIM G Y, DAHN J R. The effect of some nitriles as electrolyte additives in Li-ion batteries[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2015, 162(3): A437-A447.
- [6] KIM Y S, LEE H, SONG H K. Surface complex formation between aliphatic nitrile molecules and transition metal atoms for thermally stable lithium-ion batteries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(11): 8913-8920.
- [7] YAMADA Y, FURUKAWA K, SODEYAMA K, et al. Unusual stability of acetonitrile-based superconcentrated electrolytes for fast-charging lithium-ion batteries[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136(13): 5039-5046.
- [8] SEO D M, BORODIN O, BALOGH D, et al. Electrolyte solvation and ionic association III. Acetonitrile-lithium salt mixtures-transport properties[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2013, 160(8): A1061-A1070.
- [9] CHO Y G, KIM Y S, SUNG D G, et al. Nitrile-assistant eutectic electrolytes for cryogenic operation of lithium ion batteries at fast charges and discharges[J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(5): 1737-1743.
- [10] ROHAN R, KUO T C, LIN J H, et al. Dinitrile-monomitrile-based electrolyte system for lithium-ion battery application with the mechanism of reductive decomposition of mononitriles[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120(12): 6450-6458.
- [11] ZHANG Q, LIU K, DING F, et al. Safety-reinforced succinonitrile-based electrolyte with interfacial stability for high-performance lithium batteries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 35(9): 29820-29828.
- [12] ZHANG Q, LIU K, DING F, et al. Enhancing the high voltage interface compatibility of LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O₂ in the succinonitrile-based electrolyte[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 298: 818-826.
- [13] CHEN R, LIU F, CHEN Y, et al. An investigation of functionalized electrolyte using succinonitrile additive for high voltage lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 306: 70-77.
- [14] KIM Y S, LEE S H, SON M Y, et al. Succinonitrile as a corrosion inhibitor of copper current collectors for overdischarge protection of lithium ion batteries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(3): 2039-2043.
- [15] ABU-LEBDEH Y, DAVIDSON I. New electrolytes based on glutaronitrile for high energy/power Li-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 189(1): 576-579.
- [16] DUAN B, HONG B, LI J, et al. 1, 3, 5-Pentanetricarbonitrile additive for improving high voltage stability of lithium cobalt oxide cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 286: 86-91.
- [17] WANG L, MA Y, LI Q, et al. 1, 3, 6-Hexanetricarbonitrile as electrolyte additive for enhancing electrochemical performance of high voltage Li-rich layered oxide cathode[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 361: 227-236.
- [18] ZHA W, CHEN F, YANG D, et al. High-performance Li_{6.3}La₃Zr_{1.4}Ta_{0.6}O₁₂/poly(ethylene oxide)/succinonitrile composite electrolyte for solid-state lithium batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 397: 87-94.
- [19] SANTNER H J, MÖLLER K C, IVANČO J, et al. Acrylic acid nitrile, a film-forming electrolyte component for lithium-ion batteries, which belongs to the family of additives containing vinyl-groups[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 119: 368-372.
- [20] ZHENG X, HUANG T, PAN Y, et al. 3, 3'-sulfonyldipropionitrile: a novel electrolyte additive that can augment the high-voltage performance of LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂/graphite batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 319: 116-123.
- [21] ZUO X, DENG X, MA X, et al. 3-(Phenylsulfonyl) propionitrile as a higher voltage bifunctional electrolyte additive to improve the performance of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 30(6): 14725-14733.
- [22] HONG P, XU M, ZHENG X, et al. Effect of ethylene glycol bis(propionitrile) ether (EGBE) on the performance and interfacial chemistry of lithium-rich layered oxide cathode[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 329: 216-224.
- [23] POHL B, HILLER M M, SEIDEL S M, et al. Nitrile functionalized disiloxanes with dissolved LiTFSI as lithium ion electrolytes with high thermal and electrochemical stability[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 274: 629-635.
- [24] POHL B, GRÜNEBAUM M, DREWS M, et al. Nitrile functionalized silyl ether with dissolved LiTFSI as new electrolyte solvent for lithium-ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 180: 795-800.
- [25] LYONS L J, HUESO A P, JOHNSON T, et al. Silyl and silyl/carbonate blend electrolytes for lithium-ion battery applications[J]. *ECS Transactions*, 2016, 73(1): 281-288.
- [26] LIU Y, FANG S, SHI P, et al. Ternary mixtures of nitrile-functionalized glyme, non-flammable hydrofluoroether and fluoroethylene carbonate as safe electrolytes for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 331: 445-451.
- [27] WANG Q, ZAKEERUDDIN S M, EXNAR I, et al. 3-Methoxypropionitrile-based novel electrolytes for high-power Li-ion batteries with nanocrystalline Li₄Ti₅O₁₂ anode[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004, 151(10): A1598-A1603.